

VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

FAKULTA STROJNÍ

KATEDRA ENERGETIKY

BAKALÁŘSKÁ PRACE

2014

Martin Vobořil

Zadání bakalářské práce

Student: **Martin Vobořil**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 3907R009 Provoz energetických zařízení
Téma: **Hodnocení parních generátorů z hlediska jaderné bezpečnosti**
Nuclear Safety Evaluation in Steam Generators

Zásady pro vypracování:

Na základě studia literatury popište a analyzujte a proveďte hodnocení parních generátorů z hlediska jaderné bezpečnosti u vybraných jaderných elektráren III. generace. Vysvětlete technickou koncepci parních generátorů a zdůrazněte klady a zápory. Vytvořte přehled typů parních generátorů a rozdělte je podle vhodných kritérií. Popište technologii výroby a vlivy ovlivňující životnost a také se zaměřte na diagnostiku a monitoring.

Ve výpočtové části proveďte zjednodušený tepelný výpočet parního generátoru s návrhem základních rozměrů a výsledky aplikujte na koncepci vodorovného a svislého parního generátoru. Tepelný výkon jaderné elektrárny 3200 MWt; tři smyčkové uspořádání I.okruhu, tlak syté páry 7 MPa; teplota chladiva v I. okruhu 298,2/328,9 °C; tlak v I. okruhu 16,2 MPa; parní výkon jednoho PG 1 066 t/hod, teplota napájecí vody 225 °C.

Seznam doporučené odborné literatury:

Radko Hejzlar: Stroje a zařízení jaderných elektráren. Díl 1 a 2. Vydavatelství ČVUT v Praze. 2005. ISBN 80-01-03190-X.

Oldřich Mátal: Jaderné reaktory a jejich chlazení. Nakladatelství CERN VUT v Brně. 2001. ISBN 80-214-2028-6.

František Hezoučský: Základy teorie provozních režimů jaderných elektráren s tlakovodními reaktory. Vydavatelství ČVUT v Praze. 2005. ISBN 80-01-03324-4.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.**

Datum zadání: 13.12.2013

Datum odevzdání: 19.05.2014

prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.
vedoucí katedry

doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Hodnocení parních generátorů z hlediska jaderné bezpečnosti“ vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

14. 5. 2014

.....

Martin Vobořil

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto panu prof. Ing. Pavel Kolatovi, DrSc. za příjemné vedení, cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

1 ANOTACE

VOBOŘIL, M. Hodnocení parních generátorů z hlediska jaderné bezpečnosti: bakalářská práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2014, 41 s. Vedoucí práce: Kolat, P.

Tato bakalářská práce se zabývá hodnocením všech typů parogenerátoru a porovnání jejich základních parametrů s ohledem na jadernou bezpečnost. V prvních kapitolách jsou popsány parametry určitých parogenerátorů. Dále je přiblížen samotný zjednodušený tepelný výpočet parogenerátoru a výpočet potřebné teplosměnné plochy. Na základě výpočtu byla zvolena jedna vhodná varianta parogenerátoru. V závěru jsou parogenerátory srovnány podle jejich poruchovosti.

VOBOŘIL, M. Nuclear Safety Evaluation in Steam Generators: : Bachelor Thesis. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of energetic, 2013, 41 p. Thesis head: Kolat, P.

ANNOTATION

This bachelor thesis deals with the evaluation of all types of steam generator and comparing their basic parameters with regard to nuclear safety. In the first chapters describe the specific parameters of steam generators. It is zoomed in very simplified calculation of thermal steam generator and calculate the required heat transfer area. On the basis of calculation was chosen one suitable variant of the steam generator. At the end are steam generators compared according to their failure.

2 OBSAH

PROHLÁŠENÍ.....	3
PODĚKOVÁNÍ	4
1 Anotace	5
3 Úvod.....	8
4 Úprava vody pro jaderné elektrárny	9
4.1 Základní pojmy	9
4.1.1 Kondenzát	9
4.1.2 Přídavná voda	10
4.1.3 Soli ve vodě	10
4.1.4 Tvrdost vody	11
4.1.5 Plyny ve vodě.....	11
4.1.6 Úprava přídavné vody.....	12
4.1.7 Chemická úpravna vody	12
4.1.8 Odplyňování vody.....	13
4.2 Výměníky tepla	13
4.2.1 Kapalné teplotonosiče	15
5 Parní generátory jaderných elektráren	15
5.1.1 tlakovodní reaktory	15
5.2 VVER- 440 a VVER-1000.....	18
5.2.1 VVER -440	18
5.2.2 Snímky vnitřní části pg. VVER 440	19
5.2.3 VVER-1000	20
5.3 Základní parametry parogenerátorů pro reaktory VVER 400 a VVER 1000.....	22
5.3.1 PWR recirkulační parogenerátor	23
5.3.2 CANDU recirkulační parogenerátor	24
5.4 Rozdělení parních generátorů z hlediska proudění sekundární vody parním generátorem	25
5.4.1 Parní generátory s přirozeným oběhem sekundární vody.....	25
5.4.2 Parní generátory s nucenou cirkulací sekundární vody	25
5.5 Požadavky a kritéria kladené na parogenerátor	26
5.5.1 Materiály parogenerátorů.....	27

5.5.2	Bezpečnostní kontroly a požadavky parogenerátorů	28
6	Tepelný výpočet parogenerátorů a návrh základních rozměrů	29
6.1	Zadané parametry parogenerátorů.....	29
6.2	Určení tepelných charakteristik teplotositele	29
6.3	Střední logaritmický spád	30
6.4	Součinitel přestupu tepla mezi primární vodou a parovodní směsí	30
6.5	Součinitel přestupu tepla mezi primárním médiem a teplosměnnou trubicou	31
6.6	Součinitel přestupu tepla mezi stěnou trubky a parovodní směsí	33
6.7	Součinitel prostupu tepla mezi primárním médiem a parovodní směsí	33
6.8	Velikost teplosměnné plochy	34
	Mám tři smyčkové uspořádání I. Okruhu	34
7	Závěr	37
8	Seznam použité literatury	38
9	Seznam použitých symbolů a jednotek.....	39
10	Seznam tabulek	41
11	Seznam obrázků	41
12	Odkazy na obrázky	42

3 ÚVOD

Zabezpečení dostatku energie je nedílnou součástí dnešního světa a proto bychom se měli zaměřit na předcházení jakékoliv závady, která vede k nedostatku energie v síti. Bez energie bychom se dále nerozvíjeli, nezvyšovala by se životní úroveň, nerostla by ekonomika. Svědčí o tom mimo jiné i skutečnost, že energetické problémy jsou stále častěji projednávány na nejvyšších politických úrovních.

K jaderné energetice se většina světa přiklání kladně, najdou se ovšem i země, které nesouhlasí se získáváním energie takovým způsobem. Jedna z nevýhod jaderných elektráren je vysoký počáteční investiční kapitál a vysoké technické požadavky na provoz a zabezpečení. Proto se budují větší celky, nebo se zvyšují provozní účinnosti jednotlivých částí, a tím i celého systému jaderné elektrárny.

Samotný parogenerátor je technicky složitý a značně namáhaný systém, jehož vývoj je velmi složitý. V mé práci se zaměřím na úpravu vody pro jaderné elektrárny, jelikož kvalita vody závisí na životnosti samotné elektrárny. Porovnání vybraných druhů parogenerátoru. Na jejich základní vlastnosti, problematiku a v neposlední řadě bezpečnost. Pro jadernou elektrárnu tlakovodního typu bude proveden tepelný výpočet a stanoveny základní rozměry teplosměnných ploch.

4 ÚPRAVA VODY PRO JADERNÉ ELEKTRÁRNY

Voda, kterou používáme v jaderných elektrárnách v primárním, sekundárním (či terciárním) okruhu, jakož i v dalších zařízeních, musí být předem upravena, aby vyhovovala normám jakosti, předepsaným pro příslušná zařízení.

Voda, kterou máme obvykle k dispozici v přírodě, musí být úpravou zbavena především nečistot, přímíšenin, organických látek, rozpuštěných, solí a rozpuštěných plynů, aby netvořila usazeniny zejména na teplosměnných plochách a aby nezpůsobovala eroze a korose.

Proto důležitou součástí každé elektrárny je chemická úprava vody, na jejímž spolehlivém provozu závisí i spolehlivý chod celé elektrárny.

Dříve však, než se začneme zabývat jednotlivými postupy při úpravě vody, bude vhodné si zopakovat některé základní pojmy z tohoto oboru

4.1 ZÁKLADNÍ POJMY

4.1.1 KONDENZÁT

Obvykle rozhodující množství kondenzátu vzniká v kondenzátorech parních turbin, ale též při kondenzaci páry v jiných výměnících tepla a zařízeních.

Podmínkou hospodárnosti je správné hospodaření s kondenzátem, což je nejvhodnější voda pro napájení parních generátorů, pokud není znečištěn. Napájecí voda se vždy skládá ze směsi kondenzátu a upravené přídavné vody. Musíme si však uvědomit, že i kondenzát podléhá úpravě, ale mnohem méně nákladné, hlavně a vždy odplynění. Kondenzát totiž při styku se vzduchem přijímá z něj a rozpouští v sobě kyslík. Proto dbejme vždy o to, abychom uchovávali kondenzát v uzavřených nádobách s parním polštářem, aby nepřišel do styku se vzduchem. Kyslík, rozpuštěný ve vodě, způsobu je velmi nepříjemné důlkové korose, a proto musí být vždy z vody, které chceme použít k napájení některého z okruhů elektrárny, co nejdokonaleji odstraněn, což se provádí odplyněním, o němž pojednáme později.

4.1.2 PŘÍDAVNÁ VODA

Je to voda, kterou musíme doplňovat ztráty vody v jednotlivých okruzích elektrárny nebo obecněji jaderné energetické výroby. Informativně u kondenzační jaderné elektrárny s tlakovodním reaktorem může činit množství přídavné vody pro sekundární okruh asi 3 % z množství páry vstupující do turbín. U primárního okruhu asi 0,013 % z průtoku vody primárním okruhem.

Pro okruh chladicí vody kondenzátorů parních turbín s mokřými chladicími věžemi, v nichž dochází k značné ztrátě chladicí vody odparem, je množství přídavné vody podstatně větší a činí velmi zhruba asi tolik, kolik činí průtok páry z parních turbín do kondenzátorů.

Jako přídavnou vodu máme většinou k dispozici vodu povrchovou (z řek, jezer atd.). Spodní voda (pramenitá) není tak vhodná, protože obsahuje více minerálních látek, takže vyžaduje nákladnější chemickou úpravu.

4.1.3 SOLI VE VODĚ

Soli se vyskytují v přírodních vodách v poměrně malých koncentracích, řádově $1000 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$, takže jsou jejich roztoky velmi zředěné. Proto jsou také jejich molekuly disociovány v samostatné ionty, které nesou elektrické náboje: kationty (+) a anionty (-). Hovoříme-li o nějaké rozpuštěné soli ve vodě, např. síranu vápenatém, nepředstavujeme si ji jako molekulu CaSO_4 , nýbrž jako kation Ca^{2+} a anion SO_4^{2-} . Tyto elektricky nabitě ionty jsou příčinou konduktivity vody, čímž je umožněno určovat obsah solí ve vodě na základě měření její konduktivity.

Konduktivitou lze určit jen látky, to jest soli a plyny, které jsou ve vodě disociovány, ale ve vodě se vyskytují též látky jen neúplně (slabě) disociované, např. CO_2 nebo SiO_2 , které tvoří slabé kyseliny. Dále organické látky, které prakticky vůbec nejsou disociovány - tvoří koloidní roztoky a látky nerozpuštěné (disperse). Všechny tyto látky ovšem nelze měřením konduktivity určit. V elektrárně kontrolujeme zejména obsah solí ve vodě primárního okruhu, v kondenzátech, v přídavné vodě, v napájecí vodě, v kotelní vodě a v páře.

Tato kontrola se provádí většinou měřením konduktivity.

4.1.4 TVRDOST VODY

Tvrlost ekvivalentová je součet ekvivalentových koncentrací iontů vápníku, hořčíku, stroncia a barya. Vyjadřuje se v mmol.l^{-1} nebo $\mu\text{mol.l}^{-1}$.

Tvrlost vody způsobuje hlavně vápník a hořčík. Obsah stroncia a barya bývá obvykle zanedbatelně malý. Voda obsahující vápník a hořčík se zdá na omak drsná, tvrdá. Destiláty a vody obsahující soli sodné a draselné se zdají na omak hladké a měkké.

V měkké vodě mýdlo pění. Ve tvrdé vodě začne pění až když jsou vysráženy mýdlem všechny soli vápníku a hořčíku jako nerozpustná mýdla. Toho se také dříve využívalo k určování tvrdosti metodou Boutron-Boudetovou.

Z kationtů Ca^{2+} a Mg^{2+} vznikají při zvýšených teplotách s anionty CO_3^{2-} , SO_4^{2-} a z SiO_2 tuhé nánosy (vodní kámen do teploty 100°C , kotelní kámen při teplotách $>100^\circ\text{C}$). Proto musí být kationty Ca^{2+} a Mg^{2+} z vody odstraněny, aby nedocházelo k usazování tuhých nánosů na teplosměnných plochách. Tomuto ději se říká změkčování vody.

4.1.5 PLYNY VE VODĚ

Voda ve styku se vzduchem v sobě rozpouští dusík N_2 , kyslík O_2 a oxid uhličitý CO_2 . Kyslík a dusík jsou ve vodě ve formě neiontové.

CO_2 je rozpuštěn buď ve formě neiontové jako nedisociovaná kyselina uhličitá H_2CO_3 nebo ve formě iontové jako ion hydrokarbonátový HCO_3^- karbonátový CO_3^{2-} . Podobně v obou formách mohou být ve vodě rozpuštěny: amoniak NH_3 , sirovodík H_2S a oxid siřičitý SO_2 .

Množství rozpuštěného plynu ve vodě závisí na jeho parciálním tlaku nad hladinou vody a řídí se zákonem Henryovým-Daltónovým.

Rozpustnost plynů ve vodě klesá s rostoucí teplotou a při teplotě varu klesne teoreticky k nule. Toho se využívá k termickému odplynování vody, a nímž se seznámíme později.

Kyslík a oxid uhličitý způsobují korose zařízení, a proto musí být při úpravě vody co nejdokonaleji z ní odstraněny.

4.1.6 ÚPRAVA PŘÍDAVNÉ VODY

Voda jímaná z řeky se zbavuje nejprve hrubých nečistot v sedimentační nádrži a průchodem přes hrubé a jemné česle, případně síta.



Obr. 4.1 Hrubé česle

4.1.7 CHEMICKÁ ÚPRAVNA VODY

Na území každé jaderné elektrárny se nachází objekt (skupina budov, kde je chemická úprava vody. Zde se ve většině případů upravuje voda, která není radioaktivní. Voda sem přichází například přímo z řeky, filtruje se od mechanických nečistot, zbavuje se organických látek v čiřících reaktorech a nakonec se demineralizuje ionexovými filtry. Takovéto úpravě podléhá přídatná voda, kterou plníme primární okruh tlakovodních reaktorů, kterou plníme sekundární okruh a dále doplňujeme ztráty vody v primárním i sekundárním okruhu. Alespoň informativně si uvádíme, že chemická úprava vody na naší elektrárně VI má výkon 250 t/h demineralizované vody pro oba 440 MW bloky dohromady. Z toho se počítá pro doplňování sekundárního okruhu na každou ze čtyř 220 MW turbin 40 t/h vody. Celkem tedy 160 t/h pro doplňování sekundárních okruhů. Pro doplňování primárních okruhů jen asi 4 t/h.

V chemické úpravě vody se může dále nacházet dekarbonizační stanice, sloužící k doplňování dekarbonizovanou vodou okruhu chladicí vody kondenzátorů parních turbin. Touto vodou se kryjí především značné ztráty odparem v chladicích věžích.

4.1.8 ODPLYŇOVÁNÍ VODY

Vodu, kterou plníme primární okruh, ale i sekundární vodu, kterou napájíme do parního generátoru, musíme zbavit plynů čili odplynit.

Při styku vody se vzduchem se ve vodě rozpouští kyslík O_2 , dusík N_2 a oxid uhličitý CO_2 . Kyslík a dusík jsou ve vodě ve formě neiontové. Oxid uhličitý je ve vodě ve formě neiontové jako nedisociovaná kyselina uhličitá H_2CO_3 nebo ve formě iontové jako hydrokarbonátový ion HCO_3^- nebo karbonátový CO_3^{2-} . (Podobně se v obou formách ve vodě rozpouští NH_3 , H_2S , a SO_2 .) Kyslík a oxid uhličitý způsobují koroze, a proto je nutno je z vody co nejdokonaleji odstraňovat. Do jaké míry působí oxid uhličitý ve vodě agresivně, závisí na obsahu solí ve vodě, zejména hydrokarbonátů a na teplotě vody.

4.2 VÝMĚNÍKY TEPLA

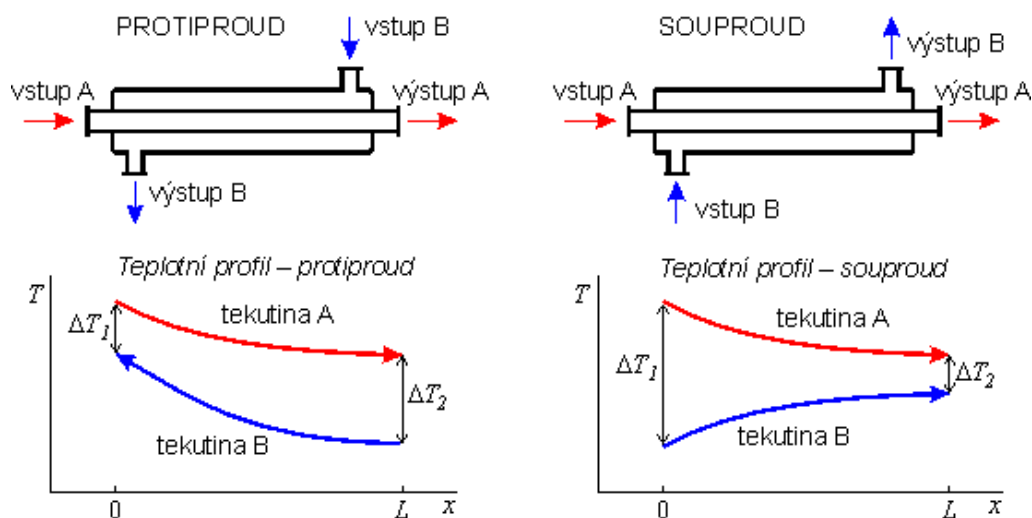
Výměník tepla je zařízení sloužící k předávání tepla z jedné látky do jiné.

V jaderné energetice mají pro nás největší význam povrchové rekuperační výměníky, to jest výměníky, u kterých ohřívající látka, proudící po jedné straně teplosměnné stěny předává teplo prostupem touto stěnou látce ohřívané, proudící současně po druhé straně stěny.

Výhodou těchto výměníků jest, že mohou oddělit radioaktivní okruh od neradioaktivního.

Hledisek, podle nichž můžeme rozdělit výměníky tepla, jak jsme již uvedli, je řada. Jedním z nich je:

VÝMĚNÍK TEPLA TRUBKA V TRUBCE – SOUPROUD A PROTIPROUD



Obr. 4.2 Trubkový výměník tepla

Optimální teplotosič

By měl mít

- velkou měrnou tepelnou kapacitu při stálém tlaku c_p
- velký součinitel tepelné vodivosti λ_f
- vysoký bod varu
- nízký bod tání
- nízký potřebný čerpací výkon
- měl by být nekorozivní
- odolný vůči teplotě a záření
- neměl by být nebezpečný z hlediska indukované aktivity
- měl by být laciný

Velká měrná tepelná kapacita c_p umožňuje přenášet jedním kilogramem teplotosiče větší množství tepla. Velký součinitel tepelné vodivosti λ_f umožňuje lepší přenos tepla, zejména zvětšení součinitele přestupu tepla \propto

$$\propto = \frac{Nu \cdot \lambda_f}{d}$$

Vysoký bod varu umožňuje přenášet teplo teplotosičem v kapalném skupenství při vysokých teplotách a pokud možno při co nejnižším tlaku. Nízký bod tání má především ten význam, aby teplotosič při pokojových teplotách zůstal v kapalném stavu a neztuhl.

Nízký potřebný čerpací výkon souvisí mimo jiné s hustotou teplotosiče a viskositou a závisí na něm velikost vlastní spotřeby energie pro pohon oběhových čerpadel či dmychadel.

Důležité také jest, aby teplotosič nekorodoval a neerodoval konstrukční materiály, s nimiž přichází v celém okruhu do styku.

Také je důležité, aby při změnách teploty, zejména při vyšších teplotách a též vlivem radioaktivního záření nedocházelo ke znehodnocování teplotosiče, například k jeho polymerizaci apod.

Z hlediska jaderně fyzikálního by měl mít teplotosič primárního okruhu malý absorpční průřez u tepelných reaktorů pro tepelné neutrony, u rychlých reaktorů pro rychlé neutrony. Z hlediska indukované aktivity by se měl teplotosič při průchodu aktivní zónou co nejméně aktivovat a vzniklé isotopy by měly mít co nejkratší poločas rozpadu.

Teplotosiče je zvykem dělit na kapalně, plynně a na tekuté kovy.

4.2.1 KAPALNÉ TEPLONOSIČE

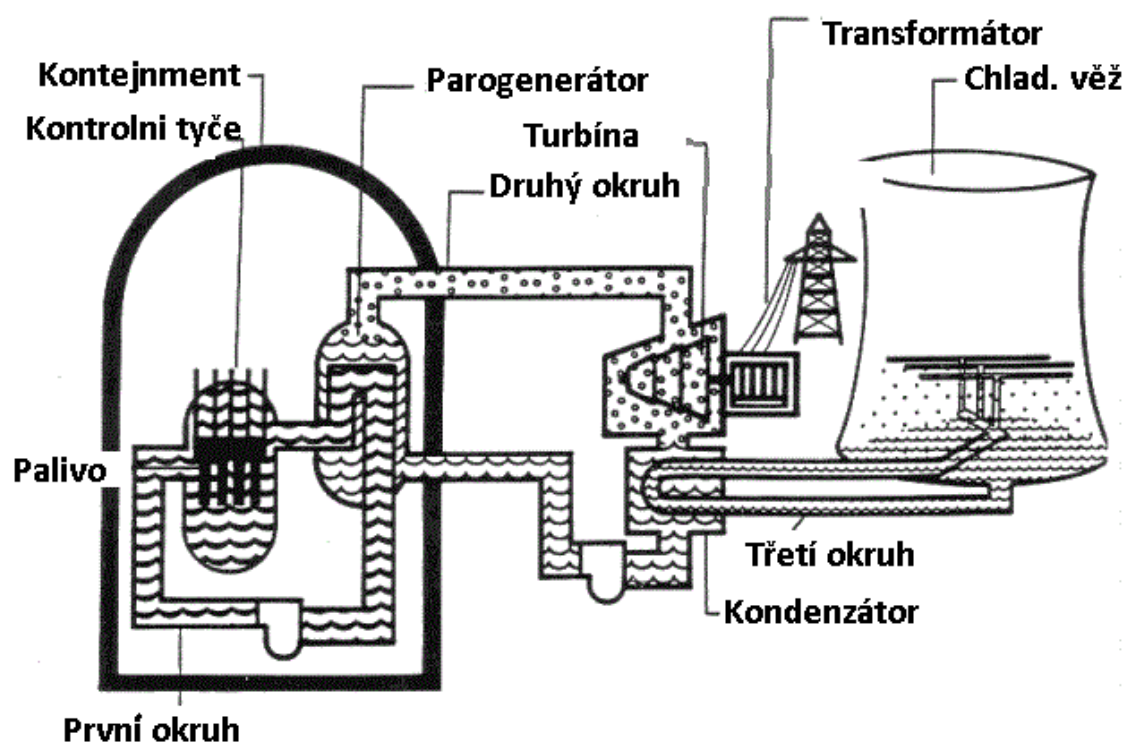
Z kapalných teplotonosičů je lehká voda H_2O nejčastěji používaným teplotonosičem. Její výhodou je snadná dostupnost, nízká cena a velmi dobře známe vlastnosti. Jsou s ní dlouhodobé zkušenosti, pokud se týká koroze i úpravy vody.

Nevýhodou vody je kromě její korozivnosti především potřebný vysoký tlak při vyšších teplotách. Chceme-li například dosáhnout teplot kolem 320°C je nutno použít v primárním okruhu tlaku vody kolem 16 MPa, což vyžaduje technologicky náročné silnostěnné ocelové tlakové nádoby reaktorů.

5 PARNÍ GENERÁTORY JADERNÝCH ELEKTRÁREN

Patří mezi nejdůležitější a největší výměníky tepla v jaderných elektrárnách. V převážné většině případů jsou součástí jak primárního tak sekundárního okruhu, protože většinou oddělují aktivní primární okruh od neaktivního sekundárního okruhu, což vyžaduje, aby byly opatřeny biologickým stíněním.

5.1.1 TLAKOVODNÍ REAKTORY



Obr. 5.1 Základní schéma tlakovodního reaktoru

Jsou to parní generátory, u nichž primárním teplotní nosičem je tlaková voda. Tato voda má vysoký tlak (10 až 17 MPa) proto, aby ji bylo možno v reaktoru ohřát na co nejvyšší teplotu (300 až 330°C) v kapalném stavu. Přitom nechceme, aby došlo k varu vody v reaktoru. Proto se tlak vody volí tak vysoký aby jemu odpovídající teplota varu byla aspoň o 20 K vyšší než je teplota vody na výstupu z reaktoru.

Z pevnostních důvodů a z hlediska co nejnižší spotřeby materiálu proudí u těchto parních generátorů primární voda uvnitř trubek a sekundární voda a pára, která má nižší tlak (4 až 7,5 MPa), v mezitrubkovém prostoru čili v tělese parního generátoru, což umožní konstruovat toto těleso se slabšími stěnami. U trubek těchto parních generátorů, které mají podstatně menší průměry (16 až 22 mm) se zvýšený tlak vody projeví podstatně méně na zvětšení tloušťky stěny, která bývá silná 1,2 až 1,8 mm. Tyto trubky musí být z nerezových ocelí nebo z vysoce legovaných nikl-chromo-vých slitin. Podobně celý povrch primárního okruhu, který přichází do styku s primární vodou, musí být z nerezavějícího materiálu. U vodorovných parních generátorů pro reaktory VVER se používá austenitická nerezová ocel. Pro trubky svislých parních generátorů západních konstrukcí se používá vysoce legovaných slitin jako je Incoloy 800, Inconel 600 nebo Inconel 690 aj. Je zapotřebí si též uvědomit, že austenitické oceli mají, horší součinitel tepelné vodivosti než uhlíkové oceli (zhruba 2x). Další nevýhodou austenitických ocelí je, že se hůře svařují. Zejména slabostěnné trubky nelze dobře svařovat na tupo. Z těchto důvodů se snažíme používat při konstrukcích parních generátorů bezešvých trubek z jednoho kusu (délky i přes 16 m), které se spojují s trubkami nebo s kolektory závalcováním a obvažením. Nepříjemnou vlastností austenitických ocelí je též jejich sklon ke korozi pod napětím v přítomnosti chlorového aniontu a kyslíku, ale též při vyšší alkalitě vody.

V mezitrubkovém prostoru na vnějším povrchu teplosměnných trubek parního generátoru, tedy na jeho sekundární straně, dochází k varu vody a je zde velký součinitel přestupu tepla. Jelikož víme, že o velikosti výsledného součinitele postupu tepla rozhoduje především menší z obou součinitelů přestupu tepla, vyplývá z toho nutnost zvýšit součinitele přestupu tepla na vnitřní straně trubek čili na straně primární vody. Toho můžeme dosáhnout především zvýšením rychlosti vody, což je snadnější uvnitř trubek nežli v mezitrubkovém prostoru.

Ochlazení primární vody v parním generátoru bývá jen 25 až 35 K. (Je dáno zhruba stejným ohřátím v reaktoru.) Z toho vyplývá nutnost nucené cirkulace primární vody, protože průtok primární vody musí mnohokrát převyšovat množství vyrobené sekundární páry, u níž dochází k větší změně měrné entalpie.

Tyto parní generátory se konstruují většinou jako výparník y bez přehříváků páry

Součinitel prostupu tepla bývá $k = 4000$ až $6000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ i více. Plošná hustota tepelného toku bývá $q = 100$ až $230 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2}$. Poznamenejme, že v aktivní zóně reaktoru je plošná hustota tepelného toku ještě o řád vyšší, proto je také aktivní zóna reaktoru podstatně citlivější na usazeniny a tedy na čistotu primární vody než parní generátor.

Rychlost primární vody v trubkách parního generátoru bývá $2,5$ až $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ i více.

Důležitá je i otázka řešení teplotních dilatací. Proto se často používá teplosměnných trubek ve tvaru U. Nesmíme též zapomenout na rozdílné hodnoty součinitelů teplotních roztažností u uhlíkových a austenitických ocelí. U austenitických je větší. To je nutno respektovat při vzájemném spojování, například přechodovými kusy.

Jelikož je parní generátor součástí radioaktivního primárního okruhu, musí být biologicky stíněn (betonovými stěnami), čili není za provozu pro obsluhu přístupný. Z toho vyplývají vysoké požadavky na konstrukci parního generátoru, technologii jeho výroby i kontrolu jakosti (zejména rentgenování svarů

Ekonomizér může být vyčleněn zvlášť mimo těleso výparníku anebo být ve společném tělese s výparníkem v místě, kde primární voda vystupuje z teplosměnných trubek do výstupní komory parního generátoru. Takže celkové uspořádání výhřevných ploch výměníku je protiproude. Použití protiproudu je nutné vzhledem k relativně nízkým teplotám primární vody na vstupu do parního generátoru.

Tepelný výkon P_{pg} předaný sekundárnímu teplotnímu nosiči v parním generátoru, se skládá z tepelného výkonu P_{ek} předaného v ekonomizéru a z tepelného výkonu P_{vyp} , předaného ve výparníku.

$$P_{pg} = P_{ek} + P_{vyp} [W]$$

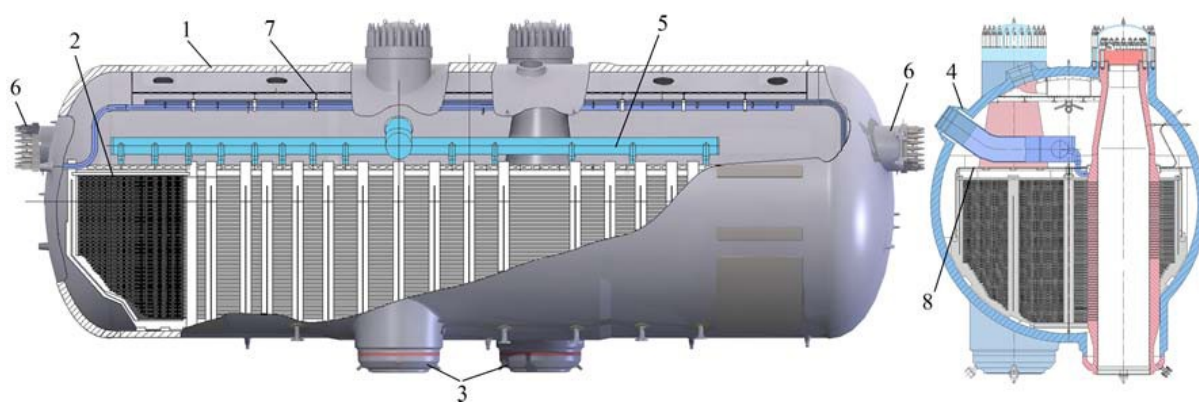
5.2 VVER- 440 A VVER-1000

Parogenerátory používané v ruských VVER-440 a VVER-1000 jsou horizontální výměníky tepla vyráběné

- ZiO (Moskva)
- Atommash(Volgograd)
- Vítkovice

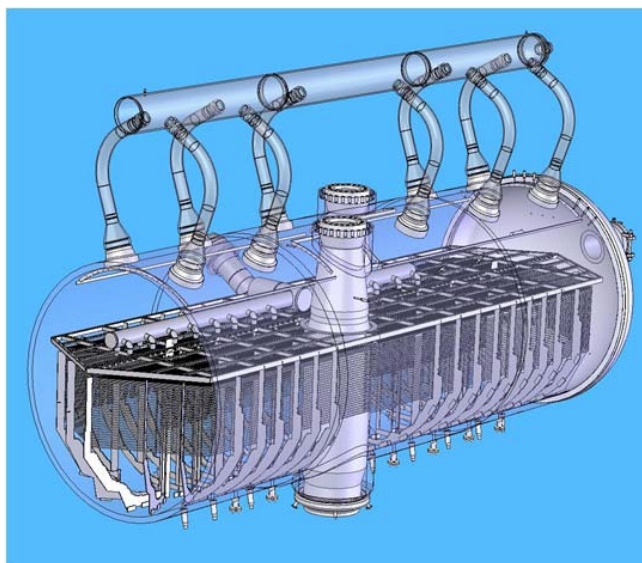
5.2.1 VVER -440

Každý reaktor VVER 440 má 6 horizontálních parních generátorů



Obr. 5.2 VVER-440

1 – nádoba, 2 – svazek trubek, 3 – vstup a výstup chlazení, 4 – vstup napájecí vody, 5 – rozdělení napájecí vody, 6 – šachta, 7 – rozdělení páry, 8 – ponořený děrovaný plech.



Obr. 5.3 Poskládání trubek u VVER-440 a VVER 1000

5.2.2 SNÍMKY VNITŘNÍ ČÁSTI PG. VVER 440



Obr. 5.4 Vnitřní část parogenerátoru

5.2.3 VVER-1000

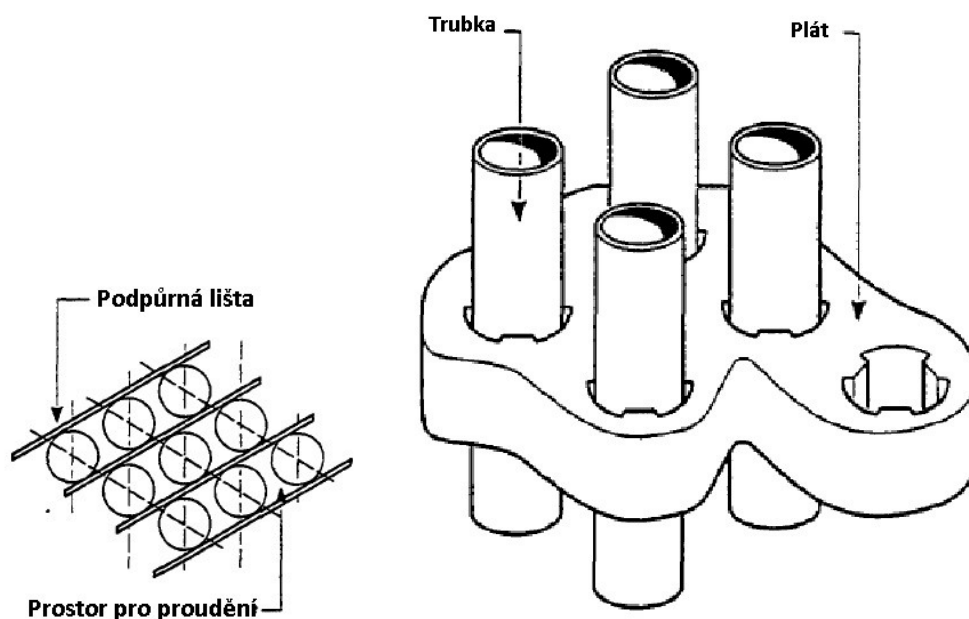
Těmito parními generátory jsou vybaveny u nás první dva 1000 MW bloky jaderné elektrárny v Temelíně. Na každý blok (reaktor) připadají 4 parní generátory.

Základní údaje o těchto parních generátorech jsou uvedeny v tabulce 1.

Výkon těchto parních generátorů se proti parním generátorům reaktorů WER-440 podstatně zvýšil a to na 750 MW., takže na 1 reaktor postačí 4 parní generátory, co už lépe odpovídá současnému světovému trendu ke snižování počtů smyček u bloků jaderných elektráren.

Teplosměnná plocha parního generátoru je tvořena vodorovnými svazky trubek o průměru 16 mm, majícími tvar U. Tyto trubky vycházejí ze svislého vstupního kolektoru primární vody a končí ve svislém výstupním kolektoru primární vody. Do obou kolektorů jsou trubky zaválcovány speciální technologií – výbuchem, čímž se najednou zaválcuje několik desítek trubek. Potom se pomocí poloautomatů trubky ještě ovařují. Vyvrtávání otvorů pro trubky do kolektorů se provádí ve vítkovických železárnách na speciálních strojích. I když je tato práce náročná, je ve srovnání s vyvrtáváním silnostěnných vodorovných trubkovnic pro svislé parní generátory technologicky mnohem jednodušší, protože tloušťka stěn svislých kolektorů je mnohem menší než u trubkovnic svislých parních generátorů (typu T).

Teplosměnné trubky o vnějším průměru 16 mm a tloušťce stěny 1,5 mm z nerezavějící austenitické oceli jsou ve svazku se střídavým uspořádáním. Rozteč mezi trubkami po výšce svazku činí 19 mm po šířce svazku (ve vodorovném směru) 23 mm. Kromě toho jsou ve svazku svislé mezery, zlepšující přirozenou cirkulaci parovodní směsi v mezitrubkovém prostoru. Vodorovné mezery usnadňují montáž. Vzájemné distancování trubek ve svazku se provádí pomocí speciálních desek, které jsou připevněny ke svislým opěrným stojinám a k žebrům, přivařeným k plášti parního generátoru.



Obr. 5.5 Dva druhy provedení oddělení trubek

Svazek trubek je poněkud kompaktnější než u parního generátoru pro VVER 440, kde je uspořádání svazku za sebou se svislými roztečemi trubek 24 mm a vodorovnými 30 mm.

Všimněme si též vstupu napájecí vody do parního generátoru. Trubka napájecí vody je přivařena k nátrubku tak, aby se v místě průchodu pláštěm nedotýkala bezprostředně pláště parního generátoru a tím bylo zabráněno vzniku teplotních pnutí v plášti. Dále pokračuje napájecí voda do kolektoru a z něho v rozváděcí trubky, které zavádějí napájecí vodu do teplejší části svazku podélně, jak již bylo uvedeno u parního generátoru pro VVER – 440.

Napájecí voda se dohřeje na teplotu varu v objemu vroucí vody mezi trubkami svazku na účet zkondenzování části vznikajících bublinek páry.

Parogenerátory VVER-440 a VVER-1000 jsou si podobné s výjimkou:

- Velikost (VVER-1000 je o 4 metry delší)
- Poskládání trubek
- Materiál výměníku
- Přisun napájecí vody
- Záchrany ventil napájecí vody (Jen u VVER-1000)
- Materiál ventilů

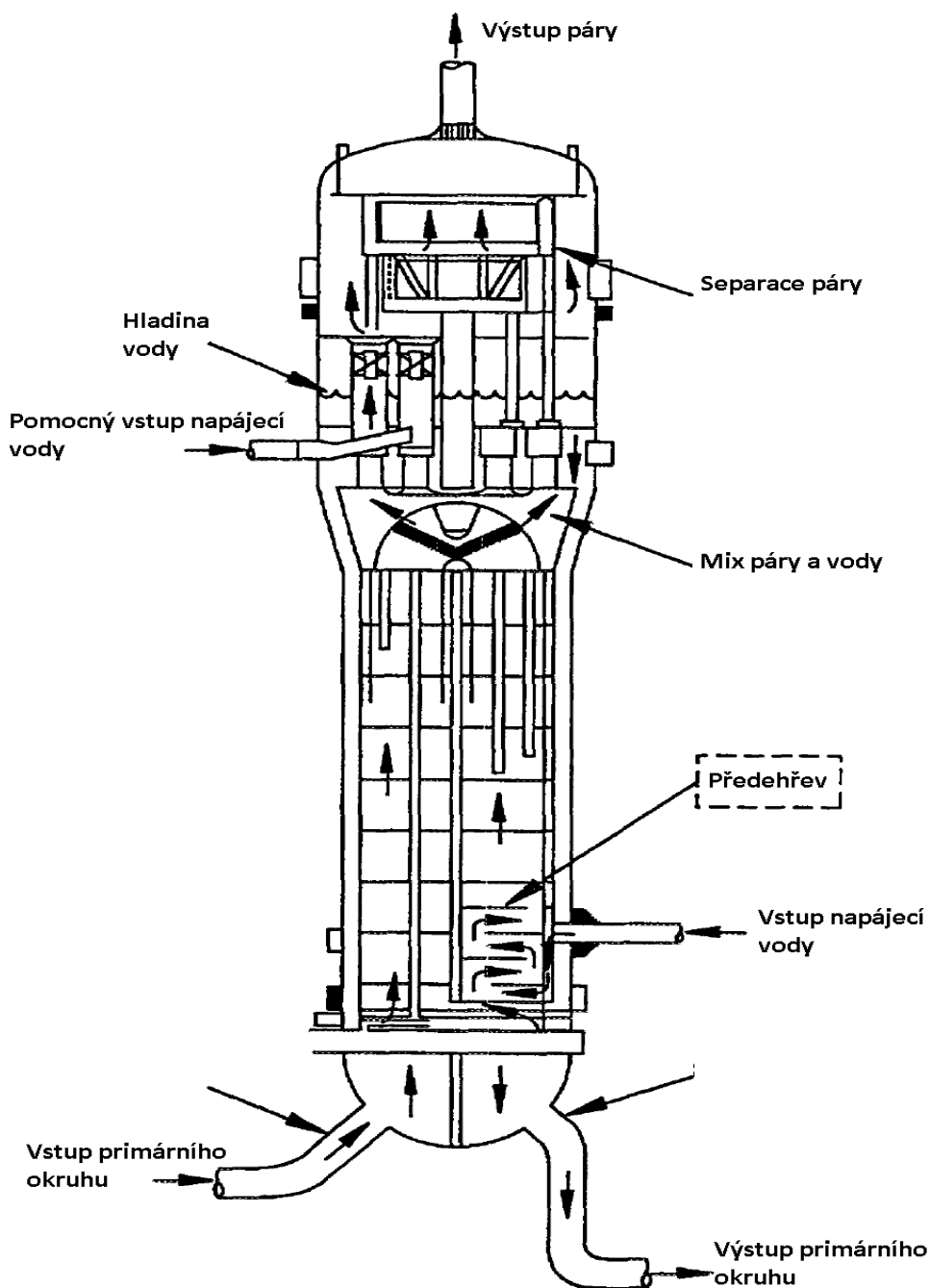
5.3 ZÁKLADNÍ PARAMETRY PAROGENERÁTORŮ PRO REAKTORY VVER 400 A VVER 1000

		VVER 440	VVER 1000
Počet parních generátorů na 1 blok	[ks]	6	4
Tepelný výkon par. generátoru	[MWt]	229,3	750
Parní výkon	[t. h ⁻¹]	450	1470
Tlak páry	[Mpa]	4,6	6,3
Teplota páry	[°C]	258,9	278,5
Teplota napájecí vody	[°C]	223	220
Průtok primární vody	[t. h ⁻¹]	4842	14800
Tlak primární vody	[Mpa]	12,3	15,7
Teplota primární vody na vstupu do P.G	[°C]	297	320
Teplota primární na výstupu z P.G	[°C]	268	289
Teplosměnná plocha výpočtová	[m ²]	2114	5040
Teplosměnná plocha skutečná	[m ²]	2510	6115
Součinitel prostupu tepla (střední) čistých	[W. m ⁻² . K ⁻¹]	4850	6020
Vnější průměr a tloušťka stěny trubek	[mm]	16x1,4	16x1,5
Rychlost primární vody v trubkách	[m. s ⁻¹]	2,37	2,6
Střední délka trubek	[m]	9	11,1
Počet trubek	[ks]	5536	11000
Vnitřní průměr kolektorů primární vody	[m]	0,8	0,834
Vnitřní průměr/délka tělesa P.G	[m]	3,21/11,8	4/14,53
Hmotnost trubek	[t]	25,89	65
Hmotnost tělesa	[t]	89,1	196
Hmotnost P.G	[t]	145	416
Hmotnost P.G na jednotku tepelného výkonu	[t/MWt]	0,632	0,43

Tab. 5.1: Základní parametry

5.3.1 PWR RECIRKULAČNÍ PAROGENERÁTOR

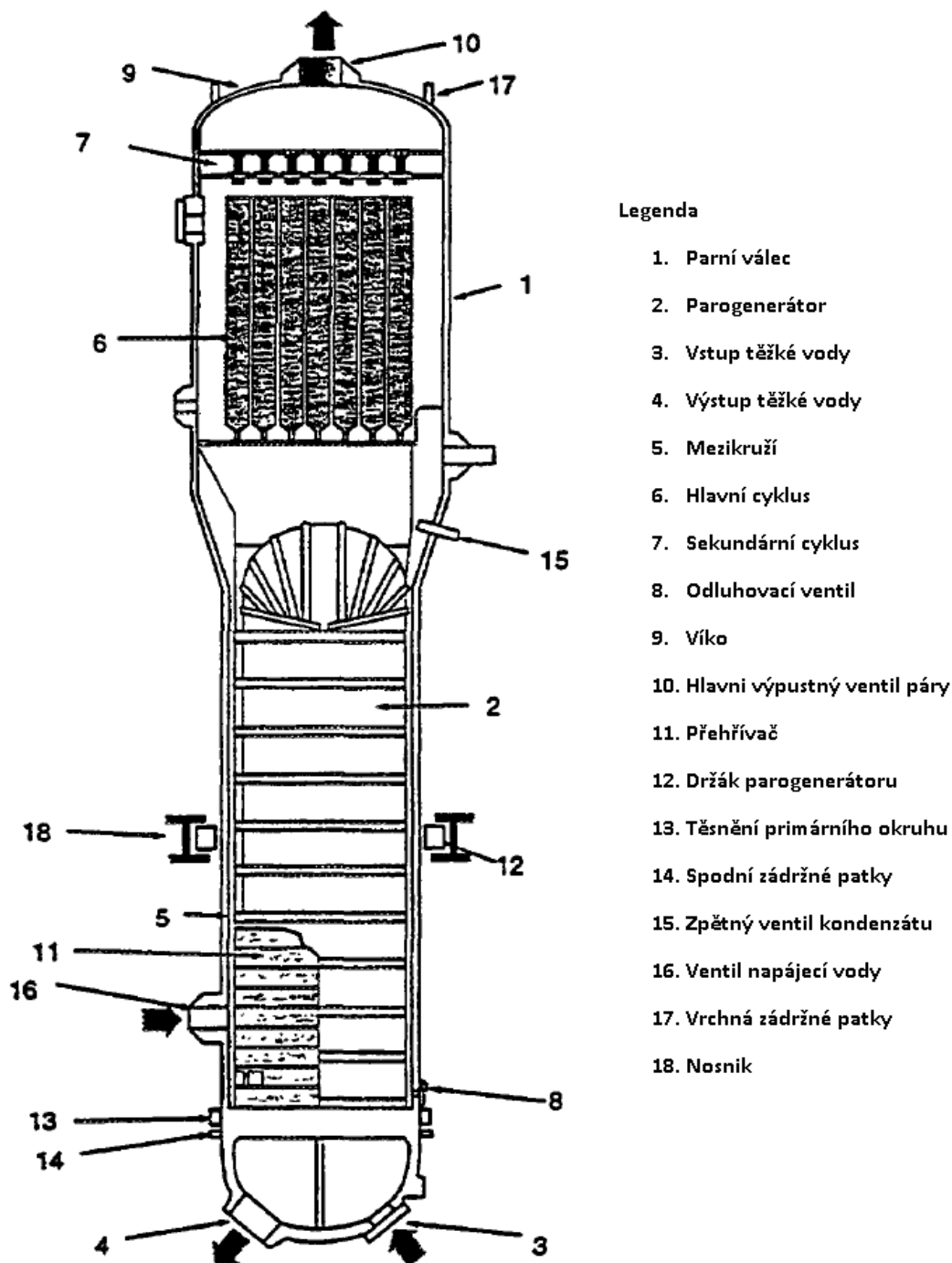
U tohoto PG. Prochází primární oběh trubkami směrem od spodu generátoru a prochází U-trubici na vrchu a zpátky dolů. Chlazení vstupuje do generátoru s teplotou 315-330°C na horké straně a vystupuje s teplotou okolo 288°C. Napájecí voda přichází zespodu PG. A ohřívá se, prochází přes separátory páry a pokračuje dál k turbíně.



Obr. 5.6 Schéma PWR parogenerátoru

5.3.2 CANDU RECIRKULAČNÍ PAROGENERÁTOR

Jsou velmi podobné PWR, liší se pouze v materiálech, velikosti trubek a celkové velikosti parogenerátorů. Pracují s menší teplotou primárního okruhu (290°C až 310°C). V současné době se používají vertikální parogenerátory postavené firmou Babcock & Wilcox Kanady.



Obr. 5.7 Schéma CANDU parogenerátoru

5.4 ROZDĚLENÍ PARNÍCH GENERÁTORŮ Z HLEDISKA PROUDĚNÍ SEKUNDÁRNÍ VODY PARNÍM GENERÁTOREM

Z tohoto hlediska můžeme parní generátory rozdělit na:

- parní generátory s přirozeným oběhem sekundární vody
- parní generátory s nuceným oběhem sekundární vody
- parní generátory s nuceným průtokem sekundární vody

(Průtok primární vody parním generátorem ve všech třech případech je nucený, protože změna měrné entalpie primární vody při průtoku parním generátorem je mnohonásobně menší než změna měrné entalpie sekundární vody, která mění skupenství – vypařuje se. To vyžaduje mnohonásobně větší průtok primární vody, což lze zajistit jen nuceným průtokem primární vody.)

5.4.1 PARNÍ GENERÁTORY S PŘIROZENÝM OBĚHEM SEKUNDÁRNÍ VODY

Přirozená cirkulace vzniká jako termosifonový efekt. Chladnější voda, která je těžší, proudí působením tíže, pokud možno neohřívanými kanály dolů a ohřívaná voda, respektive směs vody a páry, která je lehčí, stoupá mezi trubkami svazkem vzhůru.

Čím vyšší je parní generátor, tím lepší přirozenou cirkulaci je možno zajistit.

5.4.2 PARNÍ GENERÁTORY S NUCENOU CÍRKULACÍ SEKUNDÁRNÍ VODY

Nucené cirkulace se používá, je-li zapotřebí zintenzivnit přenos tepla na sekundární straně a nelze-li toho dosáhnout zvýšením přirozené cirkulace, například omezenými možnostmi zvětšení výšky parního generátoru nebo potřebou objemově zmenšit parní generátor a snížit spotřebu materiálu, což obojí nucená cirkulace umožňuje. Zvýší se však o něco provozní náklady, obvykle o velmi malou spotřebu energie pro pohon oběhových čerpadel, která zajišťují nucenou cirkulaci sekundární vody (kotlové vody) v parním generátoru. Jedná se vlastně o nucenou cirkulaci výparníkem parního generátoru.

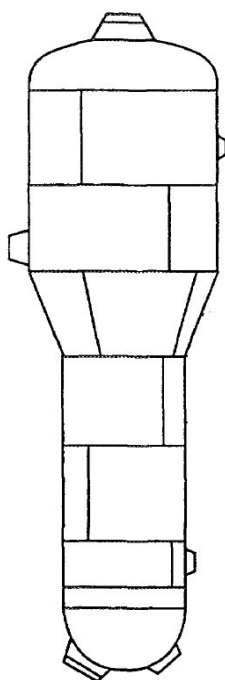
5.5 POŽADAVKY A KRITÉRIA KLADENÉ NA PAROGENERÁTOR

Schéma parogenerátoru a jeho konstrukce musí zabezpečit

- Bezpečný provoz
- Projektový výkon
- Parametry páry při různých režimech
- Ekonomický provoz při změně výkonu a režimu

Daný výkon parogenerátoru má být maximální při nominálních podmínkách, tento požadavek úzce souvisí s technicko-ekonomickým stavem jednotlivých typů jaderných elektráren a hlavně s výrobními možnostmi dodavatelů.

Všechny části parogenerátoru musí mít velkou provozní spolehlivost, životnost a absolutní bezpečnost. Životnost parogenerátorů by měla být 30 až 35 roků, to znamená 200 000 až 250 000 hodin provozu. Spoje parogenerátoru musí být vyrobené tak, aby se zabránilo míchání primárního okruhu se sekundárním. Jedná se hlavně o svary a spojení trubek. Těsnost svařovaných trubek je mírou spolehlivosti nejen parogenerátoru, ale celé elektrárny. Proniknutí radioaktivního okruhu do sekundárního může způsobit jeho zamoření, korozi a provozní problémy a na konec znemožnění obsluhy parogenerátoru. Unikání pracovního média do primárního může způsobit havárii celého reaktoru.



Obr. 5.8 Provedení svarů

5.5.1 MATERIÁLY PAROGENERÁTORŮ

Tabulka základních materiálu používaných v parogenerátorech.

Tab. 5.1: Materiály

Material	Počet částic [%]										
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Ti	Cu	Al	Fe
08Ch18N10T	<0.08	<2.0	<0.8	0.035	0.020	17-19	9-11	0.7	-	-	Zbytek
10GN2MFA	0.08-0.15	0.60-0.90	0.1-0.37	<0.025	<0.30	1.70-2.70	0.40-0.60	-	-	-	Zbytek
Incoloy Alloy 800	<0.10	<1.5	<1.0	-	0.015	19.0-23.0	30.0-35.0	0.15-0.60	<0.75	0.15-0.60	>39.5
Inconel 600	<0.15	<1.00	<0.50	<0.020	<0.015	14.0-17.0	>72.0	-	<0.50	-	6.0-10.0
Inconel 690	<0.05	<0.50	<0.50	-	<0.015	27.0-31.0	<58.0	-	<0.50	-	7.0-11.0

5.5.2 BEZPEČNOSTNÍ KONTROLY A POŽADAVKY PAROGENERÁTORŮ

Parogenerátory jsou běžně kontrolovány během odstávek, když jsou jejich vnitřní prostory dostupné. Při této kontrole se kontrolují trubky, trubkovice, trysky napájecí vody a plášť PG.

Požadavky při kontrole trubek:

	Základní kontrola	Počet trubek ke kontrole	Intervaly prohlídek
USA	Všechny trubky před spuštěním Po každé důležité změně v chemickém složení vody v sekundárním oběhu	Při první kontrole 3% všech trubek PG.	První prohlídka mezi 6-24 měsícem provozu Další 12-24 pokud se objevují problémy Jinak 40 měsíců
Kanada	25% trubek před spuštěním	Alespoň 10% trubek jednoho PG.	Každých 5 let
Česká republika	Všechny trubky před spuštěním	Alespoň 10% trubek všech PG.	Každé 4 roky
Francie	Všechny trubky před spuštěním Všechny trubky každých deset let	Alespoň 10% trubek všech PG. Všechny trubky s předchozím problémem	Každou odstávku Každé dva roky
Německo	Všechny trubky před spuštěním	10% trubek všech PG. Při každé kontrole	Každé 4 roky všechny PG. Každé dva roky polovina PG.
Japonsko	Všechny trubky před spuštěním	Když nic neuniká a nic není poškozeno tak 30% trubek Když je to naopak, tak 100% trubek	Při úniku každý rok Když není problém, tak každý další rok
Slovinsko	Všechny trubky před spuštěním	Alespoň 10% trubek všech PG.	Při každém doplňování paliva
Švýcarsko	Všechny trubky po roce provozu	Alespoň 5.5% trubek všech PG.	Každou odstávku Každé tři roky

Tab. 5.2: Požadavky při kontrole

6 TEPELNÝ VÝPOČET PAROGENERÁTORŮ A NÁVRH ZÁKLADNÍCH ROZMĚRŮ

6.1 ZADANÉ PARAMETRY PAROGENERÁTORŮ

Tepelný výkon jaderné elektrárny	$Q = 3200 \text{ MWt}$
Parní výkon jednoho parogenerátoru	$G = 1066 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$
Tlak syté páry	$p_2 = 7 \text{ MPa}$
Tlak v prvním okruhu	$p_1 = 16,2 \text{ MPa}$
Teploty v prvním okruhu vstup/výstup	$328,9^\circ\text{C} / 298,2^\circ\text{C}$
Průtok chladiva parogenerátoru	$m_v = 18400 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$

Tab. 6.1: Zadané parametry

6.2 URČENÍ TEPELNÝCH CHARAKTERISTIK TEPLONOSITELE

Pro určení tepelných charakteristik teplotní média je brána v úvahu střední teplota I. Média:

$$t_{stř} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{328,9 + 298,2}{2} = 313,55 \text{ } [^\circ\text{C}] \quad (1.)$$

Pak tepelné charakteristiky I. Média pro tuto teplotu jsou:

Měrná hmotnost	$\rho = 699,41 \text{ [kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
Měrný objem	$V = 0,00142 \text{ [m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
Kinematická viskozita	$\gamma = 0,119 \cdot 10^{-6} \text{ [m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$
Dynamická viskozita	$\eta = 8,366 \cdot 10^{-5} \text{ [Pa} \cdot \text{s}]$
Součinitel tepelné vodivosti	$\Lambda = 0,538 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
Měrná tepelná kapacita	$c_p = 5,810 \cdot 10^3 \text{ [J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
Prandtlovo číslo	$Pr = 0,931$

Tab. 6.2: Tepelné charakteristiky

6.3 STŘEDNÍ LOGARITMICKÝ SPÁD

$$t_{stř,log} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} \quad (2.)$$

$$\Delta t_1 = t_1 - t_s = 328,9 - 285,8 = 43,1 [^{\circ}\text{C}]$$

$$\Delta t_2 = t_2 - t_{NV} = 298,2 - 225 = 73,2 [^{\circ}\text{C}]$$

Pak střední logaritmický spád vychází

$$t_{stř,log} = \frac{43,1 - 73,2}{\ln \frac{43,1}{73,2}} = 56,82 [^{\circ}\text{C}]$$

6.4 SOUČINITEL PŘESTUPU TEPLA MEZI PRIMÁRNÍ VODOU A PAROVODNÍ SMĚSÍ

Pro následující výpočet je nutné vycházet z průměrů a tloušťky stěny teplosměnných trubek. Volím tedy běžně používané trubky z materiálu 08Ch18N10T $\varnothing 16 \times 1,5$

Rychlost proudění primárního média v parogenerátoru

$$w = 6,2 [m * s^{-1}]$$

Celkovou průtočnou plochu pak spočteme dle:

$$S_v = \frac{m_v}{w * \rho} = \frac{5111,11}{6,2 * 699,41} = 1,1787 [m^2] \quad (3.)$$

Průtočná plocha jedné trubky je

$$S_{stř} = \frac{\pi * d_2^2}{4} = \frac{\pi * 0,013^2}{4} = 1,33 * 10^{-4} [m^2] \quad (4.)$$

Počet trubek

$$n = \frac{S_v}{S_{stř}} = \frac{1,1787}{1,33 * 10^{-4}} = 8881 \quad (5.)$$

Bezpečný počet trubek

$$n + 20\% * n = 8881 * 1,2 = 10658 \quad (6.)$$

S ohledem na zanášení a nutnost zaslepování určité části teplosměnných trubek a vzhledem k využití místa uvnitř parogenerátoru byl počet trubek zvýšen na 10 920 kusů. Trubky jsou rozděleny do 30-ti sekcí, přičemž každá sekce má 364 trubek.

Pro nový počet trubek je celková průtočná plocha:

$$S_v = S_{stř} * n = 1,33 * 10^{-4} * 10920 = 1,4 [m^2] \quad (7.)$$

Rychlost proudění primárního média:

$$w = \frac{m_v}{s * \rho} = \frac{5111,11}{1,4 * 699,41} = 5,22 [m^{-1} * s] \quad (8.)$$

6.5 SOUČINITEL PŘESTUPU TEPLA MEZI PRIMÁRNÍM MÉDIEM A TEPLOSMĚNNOU TRUBKOU

Parametry sekundárního okruhu pro tlak $p_2 = 7 [MPa]$

Entalpie napájecí vody při $t_{NV} = 225 [^{\circ}C]$

$$i_{NV} = 967,92 [kJ * kg^{-1}]$$

Entalpie syté kapaliny při $t_s = 285,9 [^{\circ}C]$

$$i'_s = 1268,22 [kJ * kg^{-1}]$$

Entalpie syté páry při $t_s = 285,9 [^{\circ}C]$

$$i''_s = 2774,26 [kJ * kg^{-1}]$$

Výparné teplo

$$l_v = 1503,6 [kJ * kg^{-1}]$$

Reynoldsovo číslo

$$Re = \frac{w \cdot d_2}{\gamma} = \frac{5,22 \cdot 0,013}{0,119 \cdot 10^{-6}} = 570\,252 \quad (9.)$$

Pro $Re > 10^{-4}$ je Nusseltovo číslo ve tvaru

$$Nu = 0,023 * Re^{0,8} * Pr^{0,43} * \left(\frac{Pr}{Pr_{st}}\right) \quad (10.)$$

Kde Pr je Prandtlovo číslo pro střední teplotu primárního média, z lit. $Pr = 0,931$

Pr_{st} je Prandtlovo číslo pro střední teplotu stěny teplosměnné trubky. Tato teplota se určí ze středních teplot I. Média a syté páry:

$$t_{st} = \frac{t_{st\bar{r}} + t_s}{2} = \frac{313,55 + 285,9}{2} = 299,72[^\circ\text{C}] \quad (11.)$$

Prandtlovo číslo pro tuto teplotu je

$$Pr_{st} = \frac{\gamma}{a} = \frac{0,1248 \cdot 10^{-6}}{0,102 \cdot 10^{-6}} = 0,824 \quad (12.)$$

$$a = \frac{\Lambda}{(\rho \cdot c)} = \frac{0,58835}{(754,86 \cdot 5,1528 \cdot 10^3)} = 0,102 \cdot 10^{-6} \quad (13.)$$

Nusseltovo číslo tedy bude

$$Nu = 0,023 * 570\,252^{0,8} * 0,931^{0,43} * \left(\frac{0,931}{0,824}\right) = 1014,5$$

Součinitel přestupu tepla mezi primárním médiem a teplosměnnou trubkou je

$$\alpha_1 = Nu * \frac{\Lambda}{d_2} = 1014,5 * \frac{0,538}{0,013} = 41\,984 [kW * m^{-2}K^{-1}] \quad (14.)$$

6.6 SOUČINITEL PŘESTUPU TEPLA MEZI STĚNOU TRUBKY A PAROVODNÍ SMĚSÍ

Při výpočtu předpokládám bublinkový var

$$\alpha_2 = A * q^n [W * m^{-2} K^{-1}] \quad (15.)$$

Výpočtová konstanta A je určena vztahem

$$A = \frac{100}{3,3 - 0,0133 * (t_s - 100)} * \frac{4,186}{3600} \quad (16.)$$

$$A = \frac{100}{3,3 - 0,0133 * (285,8 - 100)} * \frac{4,186}{3600} = 0,140$$

Pro čistý povrch teplosměnné trubky jsem dle lit. zvolil exponent $n = 0,7$

Hodnotu středního tepelného toku nejprve zvolíme a pak pomocí počítače interační cestou upravíme.

Pro takto získanou hodnotu $q = 180 \text{ kW} * m^{-2}$ bude součinitel přestupu tepla:

$$\alpha_2 = A * q^n = 0,14 * 180^{0,7} = 5,3066 [kW * m^{-2} K^{-1}] \quad (17.)$$

6.7 SOUČINITEL PROSTUPU TEPLA MEZI PRIMÁRNÍM MÉDIEM A PAROVODNÍ SMĚSÍ

Teplosměnná trubka je z materiálu 08Ch18N10T jehož součinitel tepelné vodivosti

$$\Lambda_{st} = 18,69 W * [m^{-1} * K^{-1}]$$

Výsledný součinitel prostupu tepla danou teplosměnnou trubkou bude:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} \cdot \frac{d_1}{d_2} + \frac{d_1}{2\Lambda_{st}} \cdot \ln \frac{d_1}{d_2} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (18.)$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\frac{1}{41\,984} * \frac{0,016}{0,013} + \frac{0,016}{2 * 18,69} * \ln \frac{0,016}{0,013} + \frac{1}{5306,6}} \\ & = 3161,2 [W * m^{-2} * K^{-1}] \end{aligned}$$

Provedeme zpětně kontrolní výpočet středního tepelného toku

$$q = k * t_{stř,log} = \quad (19.)$$

$$3161,2 * 56,82 = 179\,619,4 [W * m^{-2} * K^{-1}]$$

Rozdíl oproti předpokladu je velmi malý, jeho procentuální hodnota činí 0,24%, což vyhovuje požadované přesnosti.

Dále je nutné pro kontrolní účel určit výpočtové hodnoty parního a tepelného výkonu parogenerátoru.

Pro parní výkon platí:

$$G = \frac{Q}{l_{12} + 1,01(i'_s - i_{NV})} \quad (20.)$$

$$G = \frac{1066,66 * 10^3}{1503,6 + 1,01(1268,22 - 967,92)} = 590,32 [kg * s^{-1}]$$

Pro tepelný výkon:

$$Q = G(i''_s - i_{NV}) \quad (21.)$$

$$590,32 (2774,26 - 967,92) = 1\,066\,327 [kW]$$

Také zde odpovídají výpočtové hodnoty hodnotám v zadání s postačující přesností.

6.8 VELIKOST TEPLOSMĚNNÉ PLOCHY

Teplosměnná plocha je rovna:

$$S = \frac{Q}{q} \quad (22.)$$

Mám tři smyčkové uspořádání I. Okruhu

$$Q = \frac{3200}{3} = 1066,66 [MWt]$$

$$S = \frac{1066660000}{179\,619,4} = 5938,45 [m^2]$$

Celková délka trubek:

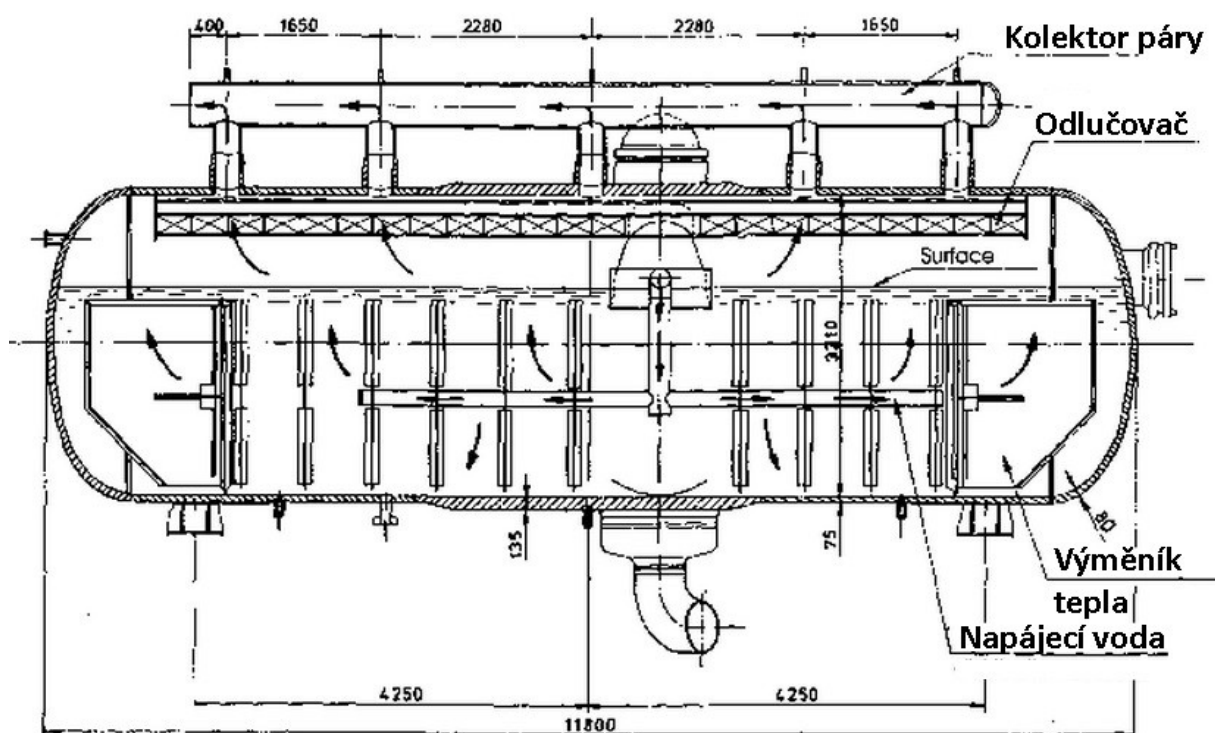
$$L = \frac{S}{\pi \cdot d_1} \quad (23.)$$

$$L = \frac{5938,45}{\pi \cdot 0,016} = 118\,141,61 \text{ [m]}$$

Délka jedné střední trubky:

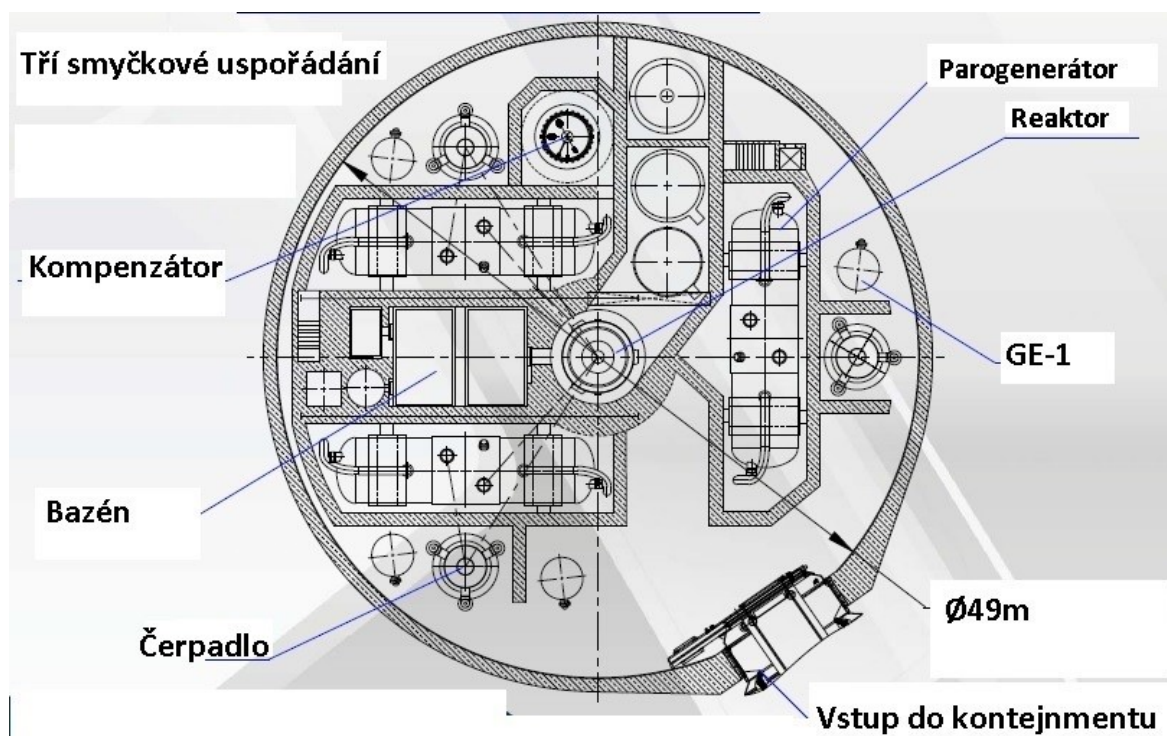
$$L_{\text{stř}} = \frac{L}{n} = \frac{118\,141,61}{10\,920} = 10,81 \text{ [m]} \quad (24.)$$

Na základě vypočtených hodnot bylo navrženo použití parogenerátoru VVER-1000 a tří smyčkového uspořádání.

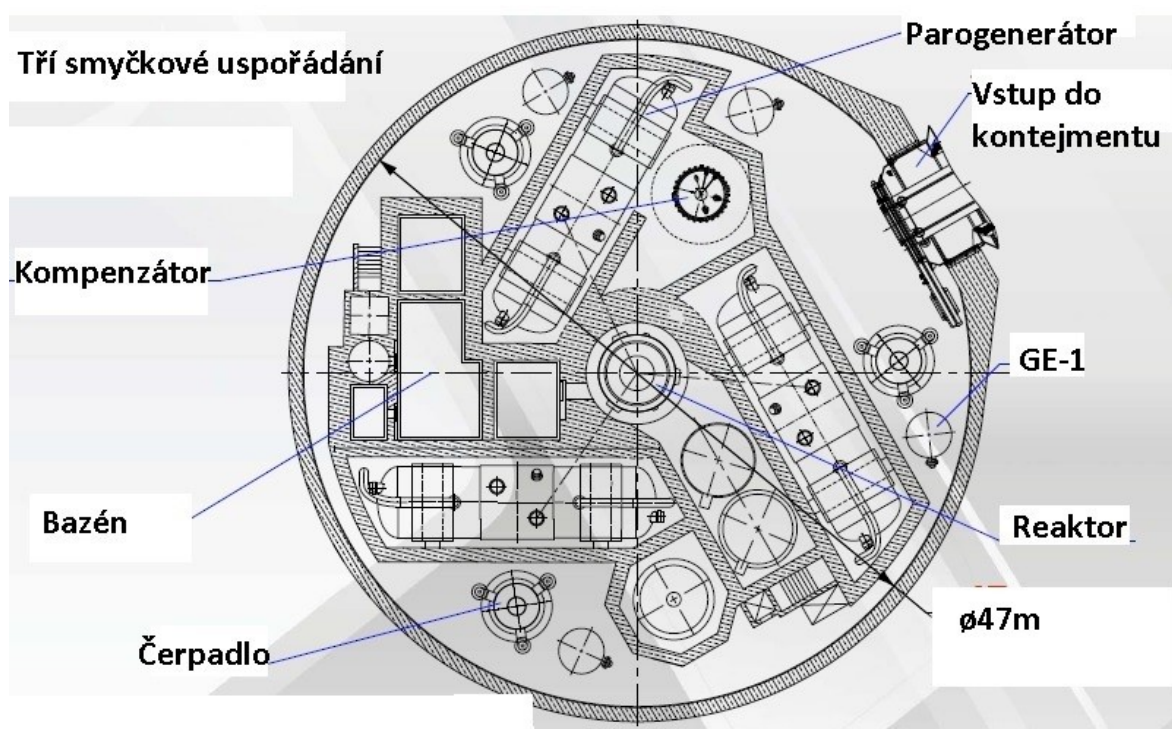


Obr. 6.1 Rozměry VVER-1000

Dva druhy tří smyčkového uspořádání parogenerátorů – volím uspořádání číslo 1.



Obr. 6.2 Tří smyčkové uspořádání č.1



Obr. 6.3 Tří smyčkové uspořádání č.2

7 ZÁVĚR

Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. Teoretická část se zabývá především úpravou vod pro jaderné elektrárny a vysvětlením základních pojmů jako je kondenzát, co znamená tvrdost vody, co dělá voda ve styku se vzduchem, jakým stylem můžeme upravovat přídavnou vodu. Dále jsou popsány výměníky tepla, které používáme při použití tlakovodních reaktorů a co je to teplotní nosič, to vše v kapitole čtyři.

Kapitola pět osvětluje základní principy použití parogenerátorů jejich typy, rozměry, parametry a materiály. Jejich rozdělení podle proudění sekundární vody parogenerátorem. Poskládání trubek v parogenerátoru a jejich součinitel tepla. Dopodrobna jsou popsány parogenerátory pro tlakovodní reaktor VVER-440 a VVER-1000. Je zmíněn PWR a CANDU recirkulační parogenerátor a bezpečnostní kontroly, požadavky kladené na parogenerátory po celém světě.

V praktické části jsem provedl zjednodušený tepelný výpočet, kde jsem počítal důležité parametry jako součinitele přestupu tepla mezi stěnou trubky a parovodní směsí, součinitel přestupu mezi primárním médiem a parovodní směsí. Bezpečný počet trubek vyšel s ohledem na jejich zaslepování na číslo 10920 a pro tuhle hodnotu je celková průtočná plocha parogenerátoru $1,4 [m^2]$. Teplosměnná plocha parogenerátoru je rovna $5938,45 [m^2]$. Celková délka trubek je $118\,141,61 [m]$ a délka jedné trubky vyšla $10,81 [m]$. Na základě vypočtených hodnot bylo navrženo použití parogenerátoru VVER-1000 a tří smyčkového uspořádání.

8 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

1. Radko Hejzlar: Stroje a zařízení jaderných elektráren. Díl 1 a 2. Vydavatelství ČVUT v Praze. 2005. ISBN 80-01-03190-X.
2. Oldřich Mátal: Jaderné reaktory a jejich chlazení. Nakladatelství CERN VUT v Brně. 2001. ISBN 80-214-2028-6.
3. František Hezoucký: Základy teorie provozních režimů jaderných elektráren s tlakovodními reaktory. Vydavatelství ČVUT v Praze. 2005. ISBN 80-01-03324-4.
4. IAEA-TECDOC-981: Assessment and Management of Ageing of Major Nuclear Power Plant Components Important to Safety: Steam Generators
5. IAEA-TECDOC-1668: Assessment and Management of Ageing of Major Nuclear Power Plant Components Important to Safety: Steam Generators
6. Dubšek, F.: Jaderná energetika, skript VUT Brno 1994
7. Šen, H.: Přednášky do předmětu Jaderná energetika, VUT Brno 2010

9 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A JEDNOTEK

Označení	Jednotka	Popis
A	—	Konstanta
G	$[kg \cdot s^{-1}]$	Parní výkon
L	$[m]$	délka
$L_{stř}$	—	Střední délka trubky
Nu	—	Nusseltovo číslo
Pr	—	Prandtlovo číslo
Pr_{st}	—	Prandtlovo číslo při střední teplotě stěny trubky
Q	$[W]$	Tepelný výkon
R_1	$[m^2 \cdot K \cdot kW^{-1}]$	Tepelný odpor médium I – trubka
R_2	$[m^2 \cdot K \cdot kW^{-1}]$	Tepelný odpor stěna – médium II
R_{st}	$[m^2 \cdot K \cdot kW^{-1}]$	Tepelný odpor stěny trubky
R	$[m^2 \cdot K \cdot kW^{-1}]$	Celkový tepelný odpor
S	$[m^2]$	Plocha
S_v	$[m^2]$	Celková průtočná plocha
$S_{stř}$	$[m^2]$	Průtočná plocha jedné trubky
c_p	$[J \cdot kg \cdot K^{-1}]$	Měrné teplo za konst. tlaku
d_1	$[m]$	Vnější průměr trubky
d_2	$[m]$	Vnitřní průměr trubky
i_1	$[kJ \cdot kg^{-1}]$	Entalpie I vody na vstupu do úseku
i_2	$[kJ \cdot kg^{-1}]$	Entalpie I vody na výstupu z úseku
i'	$[kJ \cdot kg^{-1}]$	Entalpie syté páry
i_{NV}	$[kJ \cdot kg^{-1}]$	Entalpie napájecí vody
i'_s	$[kJ \cdot kg^{-1}]$	Entalpie syté kapaliny při tlaku
i''_s	$[kJ \cdot kg^{-1}]$	Entalpie syté páry při tlaku a teplotě nasycení
k	$[kW \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$	Součinitel prostupu tepla
l_{12}	$[kJ \cdot kg^{-1}]$	Latentní teplo
m_v	$[kg \cdot s^{-1}]$	Množství primárního média
n	—	Počet trubek

Označení	Jednotka	Popis
n	—	Koeficient
p	$[MPa]$	Výpočtový tlak
q	$[kW.m^{-2}]$	Střední tepelný tok
t_1	$[^{\circ}C]$	Teplota I vody na vstupu do úseku
t_2	$[^{\circ}C]$	Teplota I vody na výstupu z úseku
t_{NV}	$[^{\circ}C]$	Teplota napájecí vody
t_{st}	$[^{\circ}C]$	Teplota stěny
$t_{stř}$	$[^{\circ}C]$	Teplota střední
t	$[^{\circ}C]$	Teplota syté páry na mezi sytosti
Δt	$[^{\circ}C]$	Rozdíl teplot v úseku
Δt_1	$[^{\circ}C]$	Rozdíl teplot
Δt_2	$[^{\circ}C]$	Rozdíl teplot
$\Delta t_{stř,log}$	$[^{\circ}C]$	Střední logaritmický teplotní spád
v	$m^3.kg^{-1}$	Měrný objem teponositele
w	$m.s^{-1}$	Rychlost teponositele
\bar{w}	$m.s^{-1}$	Střední rychlost primární vody
α_1	$W.m^{-2}.K^{-1}$	Součinitel přestupu tepla I voda – trubka
α_2	$W.m^{-2}.K^{-1}$	Součinitel přestupu tepla stěna – parovodní směs
ν	$Pa.s$	Dynamická viskozita
Λ	$W.m^{-1}.K^{-1}$	Součinitel tepelné vodivosti média
Λ_{st}	$W.m^{-1}.K^{-1}$	Součinitel tepelné vodivosti stěny
η	$m^2.s^{-1}$	Kinematická viskozita
ρ	$kg.m^{-3}$	Měrná hmotnost média

Tab. 9.1: Použité symboly

10 SEZNAM TABULEK

Tab. 5.1: Základní parametry	22
Tab. 5.1: Materiály	27
Tab. 5.2: Požadavky při kontrole	28
Tab. 6.1: Zadané parametry	29
Tab. 6.2: Tepelné charakteristiky	29
Tab. 9.1: Použité symboly	40

11 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 4.1 Hrubé česle	12
Obr. 4.2 Trubkový výměník tepla	13
Obr. 5.1 Základní schéma tlakovodního reaktoru	15
Obr. 5.2 VVER-440	18
Obr. 5.3 Poskládání trubek u VVER-440 a VVER 1000	18
Obr. 5.4 Vnitřní část parogenerátoru	19
Obr. 5.5 Dva druhy provedení oddělení trubek	21
Obr. 5.6 Schéma PWR parogenerátoru	23
Obr. 5.7 Schéma CANDU parogenerátoru	24
Obr. 5.8 Provedení svarů	26
Obr. 6.1 Rozměry VVER-1000	35
Obr. 6.2 Tří smyčkové uspořádání č.1	36
Obr. 6.3 Tří smyčkové uspořádání č.2	36

12 ODKAZY NA OBRÁZKY

Obr. 5.1 Hrubé česle	http://homen.vsb.cz/hgf/546/Materialy/Radka_2010/mc.html	12
Obr. 5.2 Trubkový výměník tepla	http://www.vscht.cz/uchi/echi/vt/trubkove.html	13
Obr. 6.1 Základní schéma tlakovodního reaktoru.....	http://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/teachers/pwr-schematic.html	15
Obr. 6.2 VVER-440	IAEA-TECDOC-981 [4]	18
Obr. 6.3 Poskládání trubek u VVER-440 a VVER 1000	IAEA-TECDOC-981 [4]	18
Obr. 6.4 Vnitřní část parogenerátorů	Šen, H.: Přednášky do předmětu Jaderná energetika, VUT Brno 2010	19
Obr. 6.5 Provedení oddělení trubek	IAEA-TECDOC-981 [4]	21
Obr. 6.6 Schéma PWR parogenerátoru	IAEA-TECDOC-981 [4]	23
Obr. 6.7 Schéma CANDU parogenerátoru	IAEA-TECDOC-981 [4]	24
Obr. 6.8 Provedení svarů	IAEA-TECDOC-981 [4]	26
Obr. 6.9 Rozměry VVER-1000	http://www.nucleartourist.com/type/vver.htm	35
Obr. 6.10 Tří smyčkové uspořádání č.1	IAEA-TECDOC-981 [4]	36
Obr. 6.11 Tří smyčkové uspořádání č.2	IAEA-TECDOC-981 [4]	36